

Transformation von GNSS-Höhen in österreichische Gebrauchshöhen mittels einer Transformationsfläche (Höhen-Grid)



*Christian Briese,
Norbert Höggerl,
Erich Imrek,
Jürgen Otter und
Diethard Ruess, Wien*

Kurzfassung

Der Einsatz von globalen Navigationssatellitensystemen (engl.: Global Navigation Satellite System – GNSS) für Positionierungsaufgaben führt zu Beobachtungen und resultierenden Positionen in Bezug zu einem globalen Koordinatenrahmen. In der Praxis sind oftmals Koordinaten und Höhen im lokalen österreichischen Koordinatenrahmen MGI gefordert. Für hohe Genauigkeitsanforderungen lässt sich diese Aufgabe nicht mit einem einzelnen für ganz Österreich gültigen Parametersatz für eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter) lösen. Daher werden in der Praxis typischerweise lokale Transformationsparametersätze eingesetzt. Bei großen Projektgebieten und entsprechend hohen Genauigkeitsanforderungen kann die Anwendung eines einzelnen lokalen Parametersatzes jedoch nicht ausreichend sein. Dieser Fall tritt z.B. bei der großflächigen Erfassung von Airborne Laserscanning (ALS) Daten auf. Um eine Aneinanderreihung von Transformationsparametersätzen und die damit auftretenden Unstetigkeitsstellen an den Transformationsgrenzen zu vermeiden steht für die Lagetransformation von ETRS89 nach Gauß-Krüger (MGI) ein österreichweites Transformationsgitter (GIS-Grid basierend auf der ntv2-Definition) zur Verfügung. Im Rahmen dieser Publikation wird nun ein weiteres österreichweites Transformationsgitter (Höhen-Grid) für die Transformation der Höhenkomponente vorgestellt. Nach einer Zusammenfassung der unterschiedlichen für Österreich relevanten Höhensysteme wird im Rahmen dieses Artikels auf die praktische Realisierung der Bezugssysteme in Österreich eingegangen. Anschließend wird die Ableitung der Höhen-Transformationsfläche (Höhen-Grid) beschrieben. Neben dem Höhen-Grid aus Nivellement und Schweremessungen wird auch noch auf ein Alternativmodell (abgeleitet aus GNSS-Beobachtungen) eingegangen. Weiters werden die Lage- und Höhen-Transformationsergebnisse für einige Testbereiche vorgestellt und diskutiert. Es wird außerdem auf die für die Praxis relevanten Korrekturwerte zwischen Transformationsergebnissen, basierend auf dem Höhen-Grid und der Gebrauchshöhe der Triangulierungspunkte, eingegangen. Eine abschließende Zusammenfassung beinhaltet Hinweise und Empfehlungen für die praktische Anwendung.

Schlüsselwörter: Transformation, Höhe, MGI, ETRS89, Airborne Laserscanning, Höhen-Grid, GIS-Grid

Abstract

The application of global navigation satellite systems (GNSS) leads to observations and resulting positions in respect to a global coordinate frame. However, within practical tasks coordinates in the local Austrian coordinate frame MGI are often essential. For applications with a high accuracy demand the application of one countrywide set of 7 parameters for a spatial similarity transformation between the global and local Austrian coordinate frame is not sufficient. Therefore, there is a need to use a local set of transformation parameters within practical applications of high accuracy demand. For big project areas and high accuracy requirements the application of one parameter set might not be sufficient. The large area acquisition of Airborne Laser Scanning (ALS) data is one example for an insufficient solution based on just one transformation parameter set. In order to avoid the need for a sequence of spatially separated transformation parameter sets and the resulting discontinuities on the transformation boundaries a countrywide transformation grid (GIS-grid based on the ntv2 format definition) that allows the planar transformation from ETRS89 to the Austrian Gauß-Krüger (MGI) coordinate frame is available for the whole country of Austria. Within this paper a further transformation grid (Height-grid) for the transformation of the height component is introduced. After a short summary about the relevant Austrian height systems this article presents an overview about the practical realisation of the Austrian co-ordinate frames. Subsequently, the determination of the Austrian Height-grid based on levelling and gravity measurements is introduced. Next to the Height-grid an alternative model based on GNSS observations is discussed. Furthermore, practical planar and height transformation results based on the transformation grids are presented and analysed. A separate section focuses on correction values between the transformation results based on the Height-grid and the conventional heights in Austria (heights in use) listed in the point descriptions of the Austrian triangulation points. A final summary provides details and recommendations for the practical application of the transformation grids.

Keywords: Transformation, height, MGI, ETRS89, Airborne Laser Scanning, Height-grid, GIS-grid

1. Einleitung

Globale Navigationssatellitensysteme (engl.: Global Navigation Satellite System – GNSS) sind sowohl aus dem geodätischen Messinstrumentenportfolio als auch aus dem kommerziellen und auch privat genutzten Elektronikbereich nicht mehr wegzudenken. Einige aktuelle Vermessungstechniken, wie z.B. das luftgestützte (Airborne) Laserscanning (ALS), sind ohne den Einsatz von GNSS kaum oder überhaupt nicht in der Praxis realisierbar. Der praktische Umgang mit GNSS führt dazu, dass neben dem traditionell genutzten Koordinatenrahmen, wie z.B. das durch Triangulierungs- und Einschaltpunkte realisierte österreichweite Koordinatensystem MGI (= Gebrauchssystem des Militärgeographischen Institutes), globale Bezugsrahmen Eingang in die lokale Vermessungspraxis finden. In der Praxis führt diese Tatsache dazu, dass Beobachtungen und resultierende Positionen zunächst in einem globalen Koordinatenrahmen anfallen und in der Folge für die weitere praktische Anwendung der Beobachtungen in einen lokalen Koordinatenrahmen transformiert werden müssen.

Für hohe landesweite Genauigkeitsanforderungen (z.B. Lage- und Höhengenaugkeit (1 sigma) kleiner als 0,5 m) lässt sich diese Aufgabe zwischen den globalen Koordinatenrahmen WGS84 oder ETRS89 [1] und dem österreichischen Koordinatenrahmen MGI [2] nicht mit einem einzelnen für ganz Österreich gültigen Parametersatz für eine räumliche Ähnlichkeitstransformation (7-Parameter) lösen. Um in der Praxis Beobachtungen vom globalen Koordinatenrahmen in den lokalen Gebrauchsrahmen (z.B. MGI) zu transformieren werden daher typischerweise lokale Transformationsparametersätze für eine 7-Parameter Ähnlichkeitstransformation in einem abgegrenzten Gebiet eingesetzt. Bei größeren Projektgebieten mit entsprechenden Genauigkeitsvorgaben im MGI ist man in der Praxis dazu gezwungen mehrere räumlich abgegrenzte Transformationsparametersätze zu bestimmen und für den jeweiligen individuell bestimmten räumlichen Bezugsbereich einzusetzen. Dieser Fall tritt z.B. bei der großflächigen Erfassung von ALS Daten auf. ALS ermöglicht heutzutage in einem spannungsfreien globalen Referenzrahmen (z.B. UTM Zone 33 bezogen auf ETRS89) eine Messgenauigkeit (1 sigma) von typischerweise 0,1 m bis 0,5 m in der Lage und 0,02 m bis 0,1 m in der Höhe (vgl. [3], [4], [5]). Um ähnliche Genauigkeiten im österreichischen Referenzrahmen zu erreichen (wie z.B. von der hydrologischen Folgeanwendung gefordert) ist

eine adäquate Transformation nach MGI essentiell. Aufgrund aktueller Projektgrößen (z.B. ganze österreichische Bundesländer) behilft man sich in der ALS Praxis heutzutage damit das Projektgebiet mit einer minimal notwendigen Anzahl von Transformationsparametersätzen abzudecken. Diese Vorgangsweise hat die folgenden gravierenden Nachteile:

- Aufgrund der lokalen Anwendung von Ähnlichkeitstransformationen ergeben sich an den räumlichen Grenzen der Transformationsparameter Unstetigkeitsstellen (Knicke der Oberflächen).
- In der Praxis ergeben sich die räumlichen Gültigkeitsbereiche der Transformationsätze oft aufgrund der aktuell vorliegenden Projektgrenzen. Bei Folgebefliegungen oder auch Wiederholungsbefliegungen (z.B. mit anderen Projektgrenzen) können bei nicht genauer Spezifikation der Transformationsparametersätze und deren räumlichen Abgrenzung bei der Verschneidung der Datensätze lokale systematische Differenzen aufgrund der unterschiedlichen Wahl der Transformationsparametersätze hervorgerufen werden. Dies kann in der Praxis bei der Aktualisierung von vorhandenen ALS Daten oder von Folgeprodukten (z.B. digitale Geländemodelle) oder bei der Veränderungsanalyse (z.B. Gletschermonitoring) relevant sein.
- Für die längerfristige Verwendung der festgelegten Transformationsparameter und der zugehörigen räumlichen Abgrenzung ist eine Verwaltung dieser Transformationsparametersätze notwendig.

Um obige durch die Aneinanderreihung von Transformationsparametersätzen entstehenden Nachteile zu vermeiden steht für die Lage-Transformation ein österreichweit anwendbares Transformationsgitter (GIS-Grid basierend auf der ntv2-Definition) seitens des BEV zur Verfügung [6], [11]. Mittels dieser Transformationsfläche ist eine österreichweite Lage-Transformation mit einer absoluten Genauigkeit kleiner als 15 cm möglich [6]. Ein analoges Produkt für die Höhen-Transformation (Transformation von ellipsoidischen Höhen nach MGI Gebrauchshöhen), wie es z.B. für die Transformation der höhenrelevanten ALS Daten benötigt würde, wird in diesem Artikel vorgestellt und steht am Portal des BEV zur Verfügung [7].

In den folgenden Kapiteln werden zunächst die für Österreich relevanten Höhen Bezugssysteme kurz vorgestellt und deren Unterschiede

$$H_{\text{ell}} = H_{\text{orth}} + N = H_{\text{norm}} + \zeta$$

H_{ell} ellipsoidische Höhe

H_{orth} orthometrische Höhe

H_{norm} Normalhöhe

N Geoidundulation

ζ Quasigeoidundulation

g_o Oberflächenschwere

Δh nivelliert

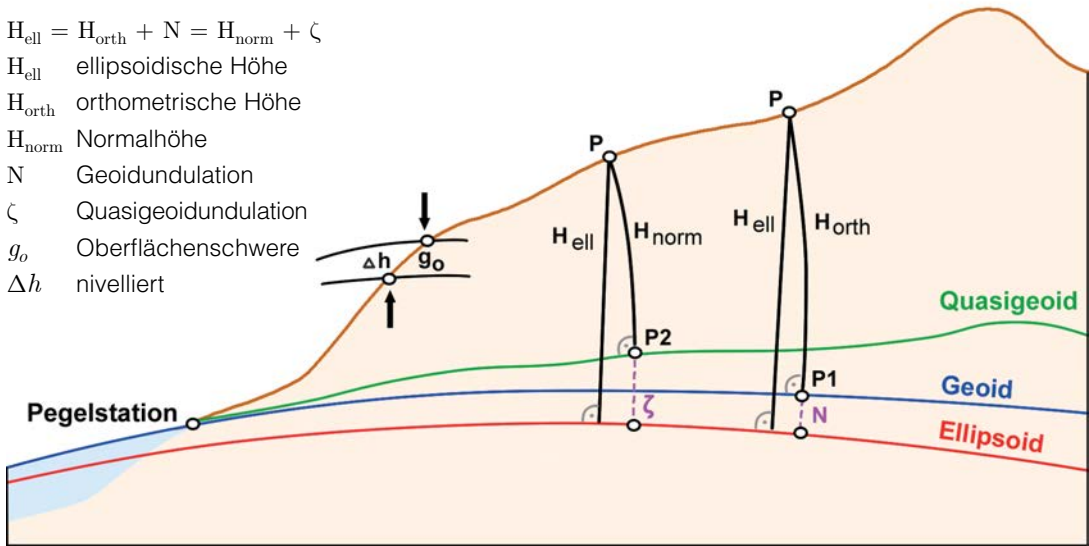


Abb. 1: Prinzipskizze Höhenarten

diskutiert. Kapitel 3 behandelt die praktische Realisierung der 3-D und 1-D Bezugssysteme in Österreich. Anschließend widmet sich das Kapitel 4 der Transformation von orthometrischen Höhen zu den Gebrauchshöhen des MGI und stellt das Transformationsgitter Höhen-Grid vor. Im Kapitel 5 wird auf ein Alternativmodell basierend auf GNSS-Messungen eingegangen und beide Modelle werden einander gegenübergestellt. Das Kapitel 6 beschreibt die Vorgehensweise der Anpassung der nicht an das Nivellementnetz angeschlossenen Triangulierungspunkte an den durch das Höhen-Grid definierten Bezugsrahmen. Zu diesem Zweck stellt das BEV Korrekturwerte zur Verfügung. Weiters werden praktische Transformationsergebnisse von zwei Testgebieten vorgestellt. Die abschließende Zusammenfassung beinhaltet Hinweise und Empfehlungen für die praktische Anwendung der Lage- und Höhentransformationsflächen (GIS-Grid bzw. Höhen-Grid) des BEV.

2. Relevante Höhenbezugssysteme für Österreich

Seit dem Einsatz von GNSS, wie GPS oder GLO-NASS, für Positionierungsaufgaben ist es notwendig geworden, besonders für die aus den Messungen abgeleiteten Höhen, genau definierte Höhenarten zu verwenden. Grundlegend wird zwischen Höhen, die das Schwerfeld berücksichtigen und solchen, die das Schwerfeld nicht berücksichtigen, unterschieden. Es gibt aber auch Mischformen, die nur das theoretische Schwerfeld der Erde berücksichtigen [8].

Es sollen die in den weiter unten folgenden Kapiteln benutzten Begriffe in den nächsten Unterkapiteln näher erklärt und beschrieben werden (siehe Abb. 1).

2.1 Ellipsoidische Höhen, Bezugsellipsoid

Die Ergebnisse von GNSS Messungen sind 3-D Koordinaten in einem globalen erdfesten Bezugsrahmen, wie z.B. im System WGS84, ITRS oder ETRS89 (abhängig davon, welche Bezugspunkte (Referenzstationen) verwendet werden). Den Systemen ITRS und ETRS89 ist das Referenzellipsoid GRS80 zugeordnet, welches als Grundlage für die Bereitstellung von geografischen Koordinaten φ und λ dient, und auf welches sich die ellipsoidischen Höhen H_{ell} beziehen. φ , λ und H_{ell} sind geometrische Größen, d.h. die Höhen H_{ell} sind ohne jegliche Schwerfeldinformation entstanden und stehen damit in keinem Zusammenhang mit der Fließrichtung des Wassers.

2.2 Geopotentielle Koten

Für großräumige Höhennetze (Länder, Kontinente), aber auch für Tunnelnetze sind als Ausgangswerte geopotentielle Koten C zu verwenden. Die geopotentiellen Koten beziehen sich auf den mittleren Meeresspiegel einer Pegelstation und sind die Aufsummierung von Kotendifferenzen Δc . Die Kotendifferenzen Δc leiten sich aus nivellierten Höhenunterschieden Δh und den Oberflächenschwerewerten g_o entlang des Nivellementweges ab:

$$C_P = \int_0^P \delta h g \cong \sum_0^P \Delta h g_o = \sum_0^P \Delta c \quad (1)$$

C_P geopotentielle Kote im Punkt P

g_o Oberflächenschwere entlang des Nivellementweges

Δh nivellierter Höhenunterschied

Δc geopotentielle Kotendifferenz

Die geopotentiellen Koten C eines Punktes sind eindeutig, d. h. sie sind vom Messweg des Nivellements unabhängig. Die C -Werte sind aber keine metrischen Werte sondern Potentialwerte ($\text{kgalm} = 10 \text{ m}^2/\text{s}^2$), d. h. im Vergleich zu Höhenwerten gibt es typischerweise eine Differenz von ca. 2 % des numerischen Wertes. Damit eignen sich die C -Werte nicht für den täglichen Gebrauch, bei dem Meter-Werte des SI-Systems verwendet werden. Die Umrechnung in metrische Höhenwerte erfolgt durch die Division von C durch einen Schwerewert. Je nach verwendetem Schwerewert ergeben sich folgende Höhen:

$$H_{\text{orth}} = C/g^* \quad \text{orthometrische Höhe} \quad (2)$$

$$H_{\text{norm}} = C/\gamma^* \quad \text{Normalhöhe} \quad (3)$$

$$H_{\text{dyn}} = C/\gamma_G \quad \text{dynamische Höhe} \quad (4)$$

C geopotentielle Kote

g^* integraler Schwerewert in der Mitte der Lotlinie zwischen Oberfläche und Geoid

γ^* Normalschwere in der Mitte der Lotlinie zwischen Oberfläche und Quasigeoid

γ_G mittlere Normalschwere für ein spezielles Gebiet G

2.3 Orthometrische Höhen H_{orth} und Geoid

Die orthometrische Höhe H_{orth} ist die Länge der Lotlinie zwischen dem Oberflächenpunkt P und dem Lotfußpunkt P1 am Geoid. Die Berechnung erfolgt ausgehend von der geopotentiellen Kote C_P des Punktes P unter Nutzung des integralen Schwerewertes g^* in der Mitte der Lotlinie (siehe Formel 2). g^* wird unter Verwendung eines DGM (Digitales Geländehöhenmodell) berechnet [9]. Die orthometrischen Höhen eignen sich nur bedingt für hydrologische Anwendungen, da Punkte mit gleicher orthometrischer Höhe nicht auf der gleichen Potentialfläche liegen müssen. Weiters ist eine exakte Berechnung des Wertes g^* aufgrund der nicht genau bekannten Dichte der Gesteinsformationen zwischen dem Punkt P und dem Geoid nicht möglich. Die Bezugsfläche für die orthometrischen Höhen ist das Geoid. Es handelt sich beim Geoid um jene Potentialfläche, die dem mittleren Meeresspiegel bei der Pegelstation entspricht. Auf das Geoid beziehen sich die Potentialwerte C und damit auch

die orthometrischen Höhen, die aus C berechnet werden. Es besteht die einfache Beziehung:

$$H_{\text{ell}} = H_{\text{orth}} + N \quad (5)$$

N Geoidundulation

Die Geoidundulation N ist der Abstand des Geoides vom Bezugsellipsoid. D. h. je nach Bezugsellipsoid (z. B. Bessel, GRS80) gibt es unterschiedliche Geoidundulationen N .

2.4 Normalhöhen H_{norm} und Quasigeoid

Die Normalhöhe H_{norm} ist die Länge der Lotlinie zwischen dem Oberflächenpunkt P und dem Lotfußpunkt P am Quasigeoid. Für die Berechnung wird neben der geopotentiellen Kote C_P des Punktes P die Normalschwere γ^* in der Mitte der Lotlinie verwendet. Für die Berechnung von γ^* ist im Gegensatz zu g^* kein DGM erforderlich, sondern es genügt die Kenntnis der geografischen Breite φ und der Höhe des Punktes P. Jedoch eignen sich auch die Normalhöhen nur bedingt für hydrologische Anwendungen, da Punkte mit gleicher Normalhöhe nicht den gleichen Potentialwert aufweisen müssen.

Die Bezugsfläche für die Normalhöhen ist das Quasigeoid. Es handelt sich beim Quasigeoid um keine Potentialfläche sondern um jene Fläche, die sich ergibt wenn die Normalhöhen H_{norm} vom Oberflächenpunkt P nach unten abgetragen werden. Es besteht die einfache Beziehung:

$$H_{\text{ell}} = H_{\text{norm}} + \zeta \quad (6)$$

ζ Quasigeoidundulation oder Höhenanomalie

2.5 Sphäroidische Höhen H_{sph}

Wie in Formel (3) ersichtlich wird für die Berechnung der Normalhöhe die geopotentielle Kote C verwendet, welche wiederum unter Verwendung von Δh aus dem Nivellement und Oberflächenschwerewerten g_o berechnet wird (siehe (1)). Wird in der Formel (1) der Wert der Oberflächenschwere g_o durch die Normalschwere ersetzt, dann ergibt sich aus dieser Berechnung die sphäroidische Höhe H_{sph} :

$$H_{\text{sph}}^P = \sum_0^P \Delta h (\gamma_o / \gamma^*) \quad (7)$$

H_{sph}^P sphäroidische Höhe in P

γ_o Normalschwere an der Oberfläche (entlang des Nivellementweges)

Die Berechnung der sphäroidischen Höhen erfolgt nicht mehr unter Verwendung der geopotentiellen Koten, daher haben diese Höhen auch keinen direkten Bezug zum Erdschwerefeld, sondern beziehen sich auf Äquipotentialflächen des vom Erdellipsoid verursachten Normalschwerefeldes. Die sphäroidische Korrektur

der Gebrauchshöhen im Präzisionsnivellement berücksichtigt lediglich die Abplattung der Erde, abhängig von der geografischen Breite. Der Einfluss der aktuellen Schwere bleibt somit unberücksichtigt. Auch die sphäroidischen Höhen eignen sich nur bedingt für hydrologische Anwendungen, da ebenfalls Punkte mit gleicher sphäroidischer Höhe unterschiedliche geopotentielle Knoten haben können.

Aufgrund der Ähnlichkeit der Formeln (1) und (7) ist auch eine „nahe Verwandtschaft“ zwischen den Normalhöhen und den sphäroidischen Höhen gegeben, was in weiterer Folge für die Transformation von orthometrischen Höhen in sphäroidische Gebrauchshöhen genutzt wird.

3. Realisierung der 3-D und 1-D Bezugssysteme in Österreich

Die in Kapitel 2 beschriebenen geopotentiellen Knoten, Höhenarten und Bezugsflächen sind durch die folgenden Realisierungen in Österreich entstanden.

3.1 European Terrestrial Reference System ETRS89

Das offizielle 3-D Referenzsystem zur Nutzung von GNSS-Verfahren ist in Österreich ETRS89. Die Realisierung von ETRS89 setzt auf die „International akzeptierte Lösung EUREF Austria 2002“ auf [10]. APOS – das Austrian Positioning Service des BEV ist mit den beteiligten Referenzstationen einerseits die nationale Realisierung von ETRS89 in Österreich, andererseits aber gleichzeitig ein Messmittel, welches bei Verwendung 3-D Koordinaten im System ETRS89 liefert. Die weitere Realisierung von ETRS89 erfolgt durch AGREF (Austrian Geodetic Reference Frame), AREF (Austrian Reference Frame) und TIREF (Tyrolean Reference Frame), sowie durch die Arbeiten zur Homogenisierung des Festpunktfeldes 1.– 6. Ordnung [11].

Unter Verwendung des dem ETRS89 zugeordneten Referenzellipsoides GRS80 werden aus den 3-D Koordinaten X , Y und Z die geografischen Koordinaten φ und λ , sowie die ellipsoidischen Höhen H_{ell} abgeleitet.

3.2 European Vertical Reference System EVRS

Ausgangswerte für physikalisch/geometrisch definierte Höhenwerte sind die unter 2.2 angeführten geopotentiellen Knoten C , welche in Österreich aus der Ausgleichung des United European Levelling Network 95/98 (UELN95/98) stammen und sich auf den Pegel Amsterdam

beziehen [12]. Die geopotentiellen Knoten C liegen für alle Punkte des Präzisionsnivellements, einige Punkte des nachgeordneten Nivellements, sowie für ca. 4 400 Lagefestpunkte in der Nivellement- und Schweredatenbank (NSDB) des BEV vor. Diese C -Werte sind die Basis für die Ableitung von orthometrischen Höhen und Normalhöhen, wie in den Formeln (2) und (3) angeführt.

3.3 Österreichisches Geoid 2008

Die Umrechnung von H_{ell} in H_{orth} erfolgt durch die unter (5) angeführte einfache Beziehung:

$$H_{\text{ell}} = H_{\text{orth}} + N,$$

wobei es sich bei N um die auf das GRS80 bezogenen Geoidundulationen handelt. Diese Geoidundulationen wurden unter Verwendung von umfangreichen Schwerefelddaten und Kollationspunkten (kombinierte GPS- und Nivellementpunkte) berechnet. Die dabei erzielte Genauigkeit liegt bei 2 cm bis 3 cm [13].

3.4 MGI – Das derzeitige Lagebezugssystem der Landesvermessung

Das im ausgehenden 19. Jhdt. durch das Militärgeographische Institut definierte und realisierte System MGI wurde nach dem klassischem Ansatz über Lagerung, Orientierung und Basis-messung erstellt [2]. 40 Punkte des für Zwecke der Mitteleuropäischen Gradmessung angelegten Triangulierungsnetzes 1. Ordnung bildeten die Grundlage für eine weitere Realisierung des Bezugsrahmens nach dem klassischen, hierarchischen „top down“-Verfahren.

3.5 Sphäroidische Gebrauchshöhen des MGI

Die in Österreich verwendeten sphäroidischen Gebrauchshöhen H_{gebr} leiten sich aus Präzisionsnivellement-Messungen des Militär-Geographischen Institutes (MGI) aus den Jahren 1873 – 1895, mit Ergänzungsmessungen bis 1912, ab. Bezugsniveau ist das Mittelwasser der Adria im Jahre 1875 des Triester Pegels am Molo Sartorio [14]. Die derzeit in Verwendung stehenden Höhen (Bezeichnung $H_{\text{ü.A.}}$) leiten sich aus Messungen von 1950 bis 2011 ab, beziehen sich aber immer noch auf den Triester Pegel. Die Höhen des Präzisionsnivellements sind die Basis für alle anderen Höhen, abgeleitet aus technischen Nivellements (Stadtnivellements, hydrografische Nivellements, ...) aber auch aus trigonometrischen Messungen (Triangulierungspunkte). Auch die Höhenknoten, sowie die Höhen-schichtenlinien in den topographischen Karten beziehen sich auf die Höhen des Präzisions-nivellements.

4. Transformation von orthometrischen Höhen H_{orth} in Gebrauchshöhen H_{gebr} des MGI

Wie schon eingangs erwähnt stehen als Ergebnis der Auswertung von GNSS-Beobachtungen (z.B. nach einer ALS Befliegung) 3-D Koordinaten in einem globalen erdfesten Bezugsrahmen, wie z.B. ETRS89, zur Verfügung ($X, Y, Z \rightarrow \varphi, \lambda, H_{\text{ell}}$). Die Umrechnung in das österreichische Gebrauchssystem des MGI kann für die Horizontalkomponenten φ, λ auch für großflächige österreichweite Projekte mit dem GIS-Grid des BEV [6], [11] erfolgen. Für die Vertikalkomponente H_{ell} wird nun ein ähnliches Transformationsgitter gesucht, welches eine Genauigkeit (1 sigma) besser < 5 cm bietet.

Alle Punkte des Präzisionsnivellements und alle an das Präzisionsnivellement angeschlossenen Punkte (aus technischen Nivellements oder auch Triangulierungspunkte) besitzen sphäroidische Gebrauchshöhen H_{gebr} und orthometrische Höhen H_{orth} (siehe Kapitel 3.2). Die Linien des Präzisionsnivellements verlaufen im Regelfall entlang von Talstrukturen und erreichen nur bei einigen Alpenpässen hochalpines Niveau, wie z. B. Arlberg, Silvretta, Großglockner Hochalpenstraße, etc., wodurch das Höhenniveau im Alpenraum nicht ausreichend repräsentiert wird. Gleichzeitig ist die Maschenweite der Nivellementschleifen im alpinen Bereich sehr groß (siehe Abb. 2). Die Analyse der Differenzen $H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}}$ entlang der Nivellementlinien zeigt auch regional unterschiedliche Korrelationen mit der

Höhe, sodass ein analytischer Formalismus mit einheitlichen Parametern für eine Transformation nicht gefunden werden kann, um eine direkte Interpolation in die Fläche mit ausreichender Genauigkeit zu ermöglichen. Als Lösungsweg wird daher nach einem Vorschlag in [15] die Differenz $H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}}$ in zwei Teile zerlegt:

$$H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}} = (H_{\text{orth}} - H_{\text{norm}}) + (H_{\text{norm}} - H_{\text{gebr}}) \quad (8)$$

$$= D_2 + D_1$$

Diese Zerlegung ergibt die zwei Terme D_1 und D_2 , wobei D_1 weitgehend die lageabhängigen und D_2 die höhenabhängigen Differenzen repräsentieren.

4.1 Modellierung von $D_1 = H_{\text{norm}} - H_{\text{gebr}}$

In einem ersten Schritt wird die Differenz $D_1 = H_{\text{norm}} - H_{\text{gebr}}$ untersucht. Diese Differenz liegt in Österreich zwischen ~ -20 cm und ~ -50 cm und zeigt einen gleichmäßigen Abfall von West nach Ost (Abb. 2). Die durchschnittliche Differenz von etwa -30 cm entspricht dem Niveauunterschied zwischen dem Adria Pegel 1875 in Triest des MGI und dem Pegel Amsterdam des EVRS, auf den sich die Normalhöhen beziehen. Weiters sind in D_1 noch die Fehler, welche durch die mangelhafte Ausgleichung des MGI-Präzisionsnivellements [14], sowie durch tektonische Veränderungen, die zwischen den Messungen des MGI (1873 – 1895) und jenen des BEV (1950 – 2011) in Österreich entstanden sind, enthalten.

Im Histogramm der Abb. 2 erkennt man die Güte der Reproduzierbarkeit an den Nivellementpunkten: für 97,6% liegen die Differenzen

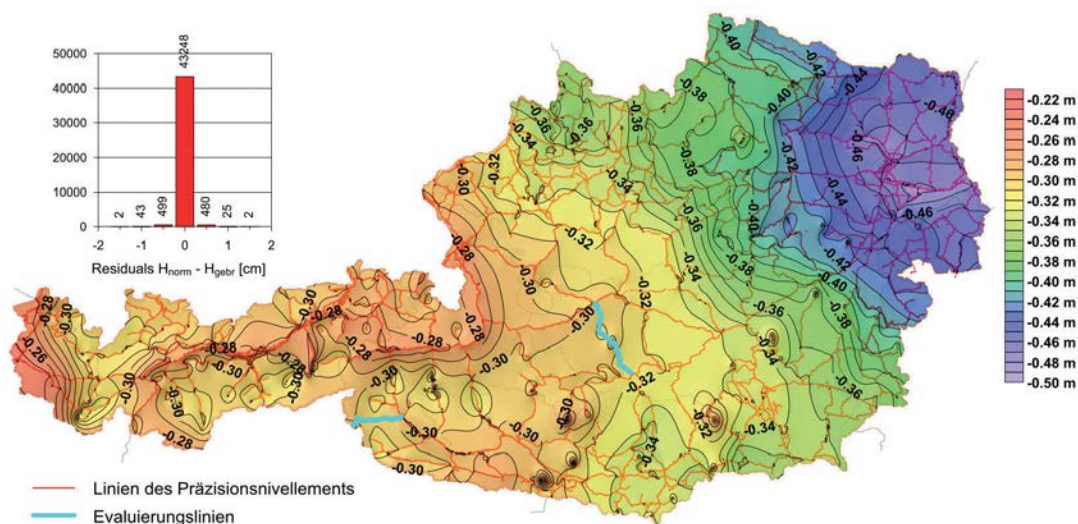


Abb. 2: Differenz D_1 : Normalhöhe – Gebrauchshöhe ($H_{\text{norm}} - H_{\text{gebr}}$)

zwischen den Ausgangswerten und den interpolierten Werten im Bereich von $\pm 0,5$ cm und für 99,8 % im Bereich von $\pm 1,0$ cm.

Da beide Höhen H_{norm} und H_{gebr} mit der Normalschwere berechnet wurden, sind sie sehr ähnlich aufgebaut und vernachlässigen den Einfluss der tatsächlichen Schwere auf die Höhe, welcher besonders im alpinen Bereich beträchtlich ist. Eine Korrelation von D_1 mit der Höhe ist daher nicht erkennbar, d. h. D_1 ist ein lageabhängiger Term, der sich für eine flächenhafte Interpolation ohne weitere Zusatzinformationen eignet.

4.2 Modellierung von $D_2 = H_{\text{orth}} - H_{\text{norm}}$

Die Differenz D_2 in (8) kann auch folgendermaßen ausgedrückt werden (siehe auch (2) und (3) in 2.2):

$$D_2 = H_{\text{orth}} - H_{\text{norm}} = \frac{C}{g^*} - \frac{C}{\gamma^*} = \frac{C}{\gamma^*} \cdot \frac{\gamma^* - g^*}{g^*} \approx \approx H_{\text{gebr}} \cdot \frac{\gamma^* - g^*}{g^*} \quad (9)$$

$$H_{\text{norm}} = \frac{C}{\gamma^*} \approx H_{\text{gebr}} \quad (10)$$

Wie aus der oben stehenden Ableitung erkennbar ist, hängt der Unterschied zwischen der orthometrischen Höhe und der Normalhöhe unmittelbar vom Unterschied zwischen der mittleren Lotlinienschwere g^* und der mittleren Normalschwere γ^* ab und nimmt mit der Meereshöhe zu. Da der Term mit den Schwerkraftverhältnissen in (9) jedoch klein ist, kann anstelle der Normalhöhe H_{norm} die Gebrauchshöhe H_{gebr} verwendet werden, wodurch eine iterative Berechnung vermieden wird, da die Gebrauchshöhen für alle verwendeten Punkte bekannt sind. Für die Berechnung von D_2 wurden die im Folgenden beschriebenen Daten verwendet.

4.2.1 Gemessene Oberflächenschwerewerte

Für die Berechnung von D_2 wurden alle in der Nivellement- und Schweredatenbank (NSDB) des BEV verfügbaren gemessenen Schwerewerte verwendet (52 964, davon 3129 im Ausland). Zirka 30 000 Schwermesspunkte befinden sich entlang der Nivellementlinien. Der Rest ist mehr oder weniger gleichmäßig mit einem mittleren Punktabstand von ~ 3 km über Österreich verteilt. Dieser mittlere Punktabstand repräsentiert jedoch die raue Topographie der Alpen nicht ausreichend, zudem sind die Punkte auch nach Kriterien der Zugänglichkeit ausgesucht worden, wodurch extreme Bergregionen weniger berücksichtigt wurden.

4.2.2 Interpolierte Schwerewerte

Zur Verdichtung der unter 4.2.1 angeführten Oberflächenschwerewerte wurden interpolierte Schwerewerte verwendet für:

- ca. 50 800 Lagefestpunkte 1.–6. Ordnung,
- ca. 47 200 Höhenfestpunkte aus PN (Präzisionsnivellement) und NN (nachgeordnetes Nivellement),
- ca. 358 000 Gitterpunkte des DGM (Rasterweite 500 m).

Diese zusätzlichen Punkte legen ein dichtes Raster von Punkten über ganz Österreich, indem auch durch die Nutzung der TP (Triangulierungspunkte) Extremstellen erfasst werden. Die Interpolation der Oberflächenschwerewerte erfolgte unter Verwendung des Bouguer-Schwerefeldes, auf Grundlage der Bouguer-Karte des BEV [16].

4.2.3 Berechnungen und Ergebnisse für D_2

Für die Berechnung von D_2 ist die Berechnung von g^* , der mittleren Lotlinienschwere von besonderem Interesse. Die Lotlinienschwere wird unter Nutzung eines DGM für die Berücksichtigung des Masseneinflusses berechnet. Da die Schwere entlang der Lotlinie im Gebirge nicht linear verläuft, wird je nach Höhenlage des Oberflächenpunktes mit 3 oder 5 Zwischenpunkten in der Lotlinie g^* gerechnet [9]. Mit Anwendung dieser Methode bleibt der Fehler in der Berechnung von g^* unter $1,1$ mGal ($= 1,1 \cdot 10^{-5}$ m/s²) und somit der Einfluss auf die orthometrische Höhe unter 2 mm [17]. Der Einfluss der nicht genau bekannten Gesteinsdichte, welche bei der Massenreduktion verwendet wird, wurde bereits in [18] abgeschätzt und liegt ebenfalls in einer Größenordnung von wenigen Millimetern.

In Abb. 3 ist als Ergebnis der Auswertung der Formel (9) die Differenz $D_2 = H_{\text{orth}} - H_{\text{norm}}$ dargestellt. Sehr klar erkennbar ist die Korrelation mit der Topografie, speziell im alpinen Bereich. Der höhenwirksame Einfluss der Schwere liegt im Bereich von -0 cm bis maximal 50 cm. Weiß dargestellt sind die gemessenen Schwerpunkte. Es sind deutlich die Punkte an den Nivellementlinien und einige dichte Vermessungsgebiete aus geophysikalischen Projekten zu erkennen.

Im Histogramm ist die Reproduzierbarkeit an den Stützstellen wiedergegeben: 89,9 % befinden sich im Bereich $\pm 0,5$ cm, 99,6 % sind im Bereich von $\pm 1,0$ cm. Die in D_2 ausgedrückten Differenzen $H_{\text{orth}} - H_{\text{norm}}$ drücken unmittelbar den Unterschied zwischen den orthometrischen und den Normalhöhen aus, da beide Höhen von der gleichen geopotentiellen Kote C abgeleitet

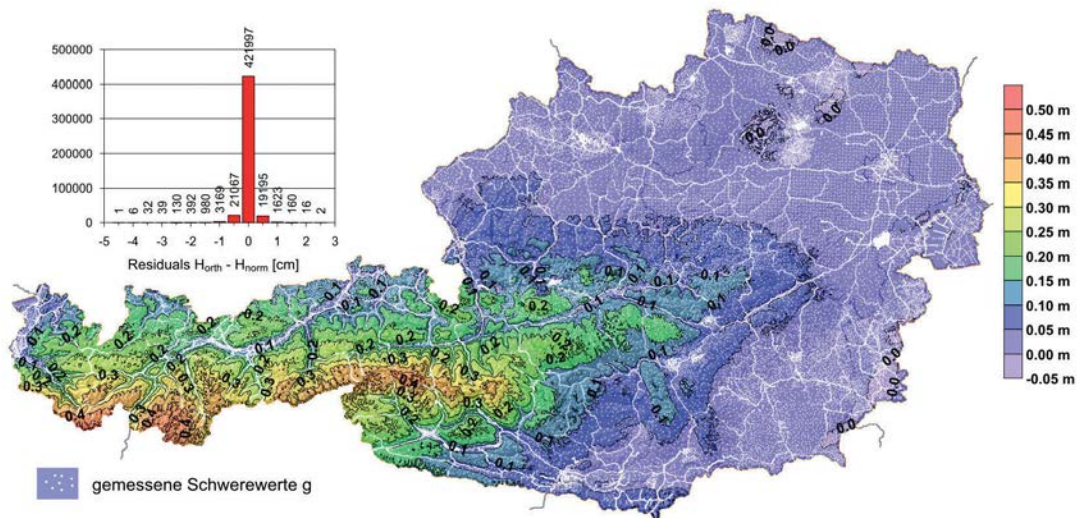


Abb. 3: Differenz D_2 : orthometrische Höhe – Normalhöhe ($H_{orth} - H_{norm}$)

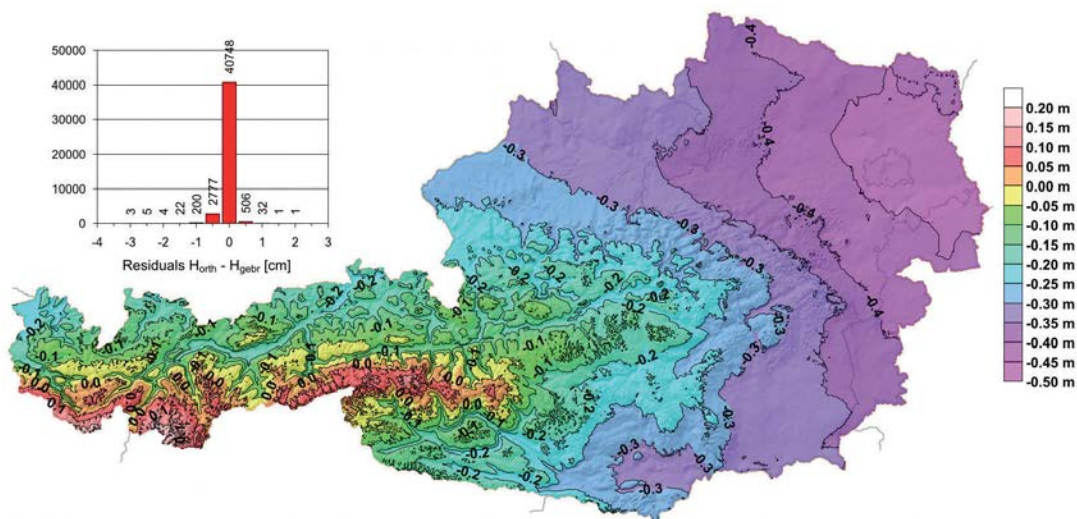


Abb. 4: Transformationsfläche (Höhen-Grid): orthometrische Höhe – Gebrauchshöhe ($H_{orth} - H_{gebr}$)

werden. D. h. es gibt keine Epochendifferenzen wegen verschiedener Messzeitpunkte, die Differenzen sind zeitunabhängig. Die Differenzen D_2 entstehen dadurch, dass für die Berechnung der orthometrischen Höhe die tatsächliche Schwere und für die Berechnung der Normalhöhe die theoretische Schwere verwendet wird. Dadurch sind im Bergland auch die Differenzen am größten.

4.3 Transformationsfläche für H_{orth} nach H_{gebr}

In Formel (8) wurde die Differenz D_1 und D_2 dargestellt:

$$H_{orth} - H_{gebr} = (H_{orth} - H_{norm}) + (H_{norm} - H_{gebr}) \quad (11)$$

$$= D_2 + D_1$$

Durch Umformung erhält man:

$$H_{gebr} = H_{orth} - (D_1 + D_2) \quad (12)$$

In Abb. 4 sind die beiden Anteile $D_1 + D_2$ zu sehen, welche das endgültige Höhen-Grid mit einer Gitterweite von 500 m darstellen.

Das Histogramm zeigt für die Punkte, an denen exakt berechnete orthometrische Höhen des Nivellements vorliegen, dass 99,4 % innerhalb $\pm 0,5$ cm und 99,9 % innerhalb $\pm 1,0$ cm liegen.

4.3.1 Evaluierung der Transformationsfläche

Eine Evaluierung der Transformationsfläche erfolgte durch Eliminierung von 2 Linien des Präzisionsnivelements aus dem Datenbestand. Es handelte sich dabei um die Linie über das Glatzjoch (Steiermark) mit 143 Punkten und einem Höhenunterschied von 1 237 m ($H_{\max} = 2023$ m), sowie die Linie auf den Stallersattel (Osttirol) mit 140 Punkten und einem Höhenunterschied von 1380 m ($H_{\max} = 2083$ m) (siehe Abb. 2 – Evaluierungslinien). Ein Vergleich der Transformationswerte D_1 und D_2 mit und ohne diese Linien ergibt die im Histogramm dargestellten Werte (Abb. 5).

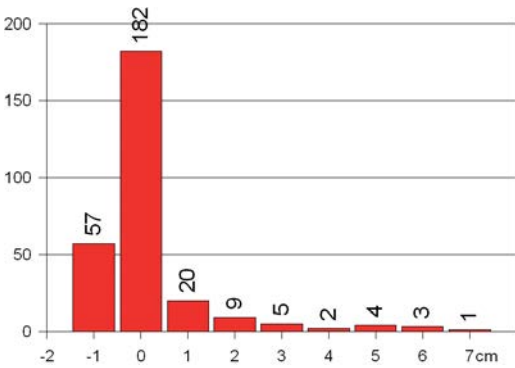


Abb. 5: Differenzen in den Transformationswerten mit und ohne Evaluierungslinien

99% der Punkte weisen eine Differenz $< \pm 5$ cm auf; die maximale Differenz ist < 8 cm. Abseits der Nivellementlinien kann keine exakte Abschätzung gegeben werden, wie genau von H_{orth} auf H_{gebr} mit dem Höhen-Grid interpoliert werden kann.

Die Unterschiede zwischen orthometrischen Höhen H_{orth} und Gebrauchshöhen H_{gebr} entlang des Nivellementweges sind in Abb. 6 für die o. a. Linie über das Glatzjoch dargestellt. Die Korrelation $H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}}$ mit dem Geländeprofil ist deutlich erkennbar, wobei der Einfluss der „Evaluierungs-

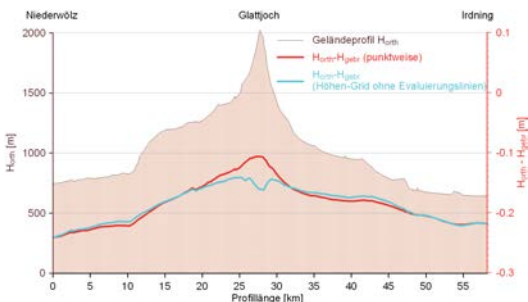


Abb. 6: Differenzen $H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}}$ für die Nivellementlinie über das Glatzjoch

linie“ auf das Ergebnis nur im Bereich der Passhöhe am Glatzjoch zu merkbaren Differenzen von 5 cm führt. Der maximale Gradient für die Differenz $H_{\text{orth}} - H_{\text{gebr}}$ liegt bei 1,7 cm/1 km Wegstrecke oder 10 cm/1000 m Höhenunterschied.

5. Ein Alternativmodell zum Höhen-Grid

Im vorangegangenen Kapitel wurde das aus Nivellement und Schwere abgeleitete Höhen-Grid, als Differenz zwischen Gebrauchshöhe und orthometrischer Höhe, beschrieben.

Nachdem für 50 % der Triangulierungspunkte des staatlichen Festpunktfeldes (Lagefestpunkte) sowohl eine Realisierung der Gebrauchshöhe als auch der orthometrischen Höhe vorliegt, bietet es sich an, unter Verwendung dieser Höhenwerte, eine alternative Lösung zum Höhen-Grid zu erstellen.

5.1 Orthometrische Höhen der Triangulierungspunkte (TP)

Mit ca. 130 000 GNSS-Basislinien zwischen 28 200 TP wurden, unter Anwendung der Ausgleichsrechnung, Netzberechnungen zur Bestimmung homogener Koordinaten im System ETRS89 durchgeführt [11]. Die erhaltenen Koordinaten sind mit dem offiziellen 7-Parameter-Transformationsatz für Österreich in das System MGI transformiert worden. Die Verwendung von Geoidundulationen des Österreichischen Geoids 2008 ermöglichte die Umrechnung der ellipsoidischen Höhen in orthometrische Höhen (Abb. 7). Im Vergleich mit den bekannten Gebrauchshöhen der TP wird der benötigte Differenzwert für das alternative Modell des Höhen-Grid erhalten.

$$H_{\text{orth}} = H_{\text{ell}}^{\text{Bessel}} - N_{\text{Bessel}} = H_{\text{ell}}^{\text{GRS80}} - N_{\text{GRS80}} \quad (13)$$

Die Lösungen für das alternative Modell sowie für das Höhen-Grid sind aus den nachfolgenden Abbildungen 8 und 9 zu ersehen, wobei deutliche Unterschiede erkennbar sind. Eine Visuali-

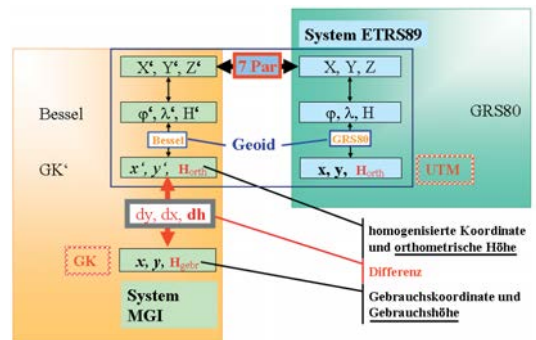


Abb.7: Verknüpfung ETRS89 – MGI

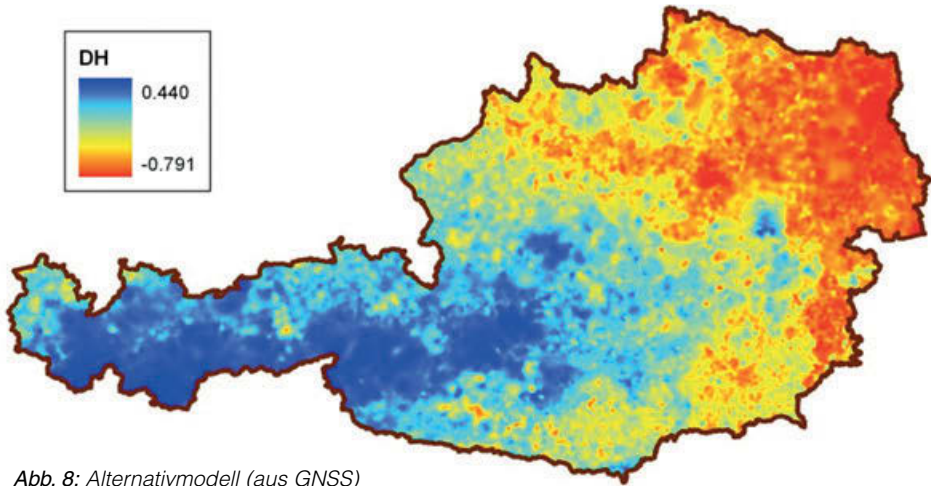


Abb. 8: Alternativmodell (aus GNSS)

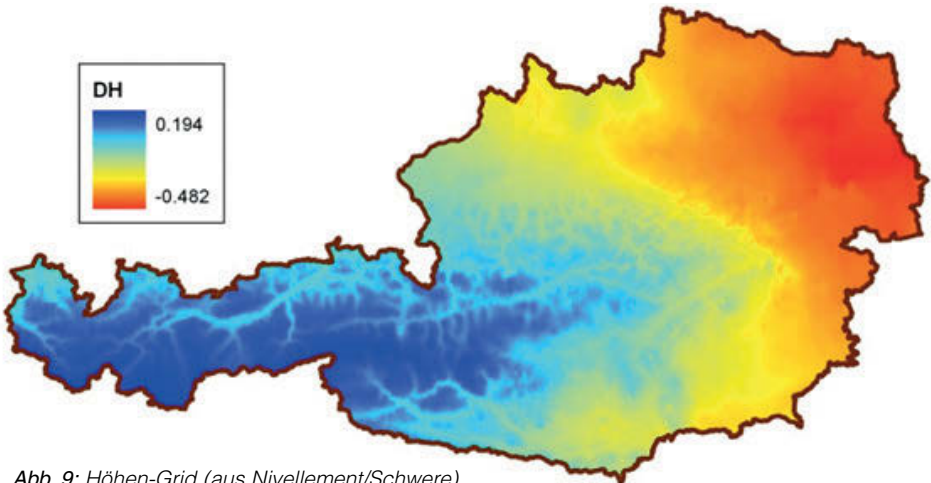


Abb. 9: Höhen-Grid (aus Nivellement/Schwere)

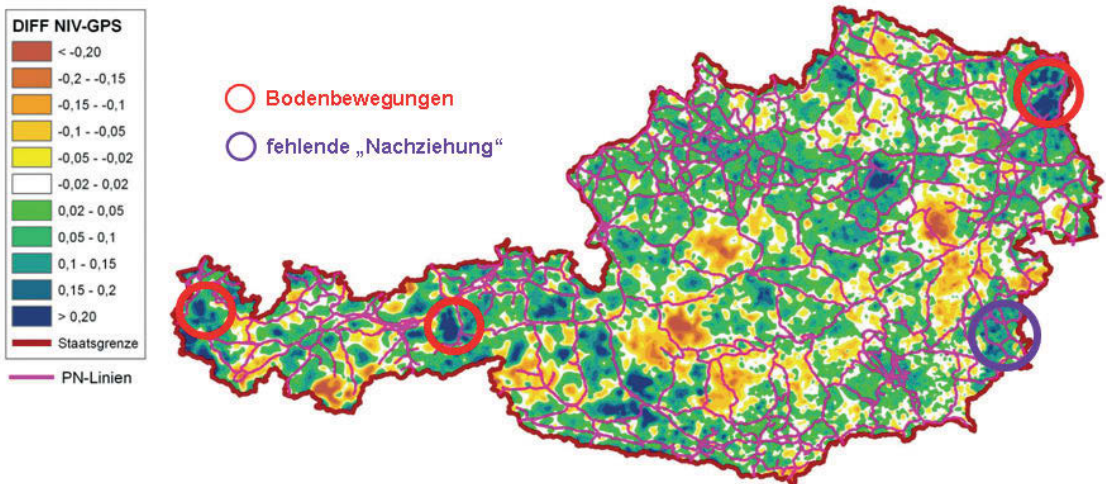


Abb. 10: Differenz zwischen Höhen-Grid und Alternativmodell in [m]

sierung des Differenzmodells der beiden Gitter ist der Abb. 10 zu entnehmen.

5.2 Gebrauchshöhen der Triangulierungspunkte (TP)

Die wesentlich feinere Strukturierung des alternativen Modells ist mit den sehr unterschiedlichen Realisierungsmethoden und -genauigkeiten in der Bestimmung der Gebrauchshöhen der TP erklärbar. Der prozentuelle Anteil der einzelnen Methoden der Höhenbestimmung der TP stellt sich folgendermaßen dar:

- 5 % Nivellementanschluss,
- 5 % GNSS und Geoid,
- 90 % trigonometrische Höhenbestimmung.

Eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Modellen, im Rahmen der Genauigkeit der Höhenbestimmung mittels GNSS und der Genauigkeit des Geoides, ist lediglich an den Punkten mit Nivellementanschluss (mittlere Abweichung $0,011 \pm 0,044$ m) gegeben. Der Rest wird durch die geringere Genauigkeit der trigonometrischen Höhenmessung – ca. Faktor 100 bei 1 km Entfernung im Vergleich zum Nivellement – dominiert. Selbst bei der Bestimmung von Neupunkten mittels GNSS und Geoid werden dessen Gebrauchshöhen in der Regel an die Höhen der umliegenden Punkte angepasst. Somit sind die Gebrauchshöhen jener GNSS-Neupunkte von gleicher Güte wie die umliegenden, meist trigonometrisch bestimmten Punkte.

5.3 Fehlereinflüsse

Der eklatante Abfall der Genauigkeit der trigonometrisch bestimmten Höhen zu jener der Nivellementhöhen ist auf systematische Einflüsse zurückzuführen, die entweder bei der Messung (Refraktion) oder/und bei der Berechnung (Lotabweichung, Bodenbewegung, Anpassung an Nivellement) nicht berücksichtigt wurden.

Durch die in der Praxis nicht realisierte Gleichzeitigkeit der Höhenwinkelmessung bleiben unterschiedliche Refraktionswirkungen in den Messdaten erhalten. Die Lotabweichungen (bis zu 0,01 gon) an den Punkten waren erst ab der Geoidlösung 1987 verfügbar und wurden daher nur bei einem geringen Prozentsatz der heute vorhandenen Punkte berücksichtigt.

Neuere Ausgleichungen mit allen Messdaten eines Punktes – sämtliche Messdaten der Punkte sind ab 1920 verfügbar – aus verschiedenen Epochen zeigen, dass ca. 15% der Punkte von Bodenbewegungen (Senkungen, Rutschungen) betroffen sind. In der Vergangenheit wurden im

Zuge von Nivellementmessungen bereits vorhandene TP mitbestimmt und deren Höhenwerte durch das Nivellementergebnis ersetzt. Die Gebrauchshöhen der Nachbarpunkte wurden in der Folge allerdings vielfach nicht an die neue Höhe angepasst (fehlende „Nachziehung“).

Ein aus den Gebrauchshöhen und orthometrischen Höhen der TP abgeleitetes Höhen-Grid würde all diese systematischen Einflüsse enthalten. Man würde zwar dadurch eine relativ gute Anpassung an allen Lagefestpunkten erreichen, doch der Bezug zum genaueren Nivellement ginge verloren. Aus diesem Grund erhielt das aus dem Nivellement und der Schwere abgeleitete Höhen-Grid den Vorzug. Das Alternativmodell (nur Höhe) in Verbindung mit dem GIS-Grid (nur Lage) [6] wird allerdings zur Realisierung des staatlichen geodätischen Bezugssystems MGI mittels APOS-RTK via Mobile Internet eingesetzt, um über dieses Service eine bestmögliche Anpassung an die Koordinaten und Höhenwerte aller Lagefestpunkte zu erreichen.

6. Praktische Anwendung des GIS- und Höhen-Grid zur Transformation zwischen ETRS89 und MGI

In den folgenden beiden Unterkapiteln soll die praktische Anwendung des GIS-Grid für die Lagetransformation und des Höhen-Grid für die Höhentransformation von ETRS89 nach MGI demonstriert werden. Ausgehend von den bekannten ETRS89-Koordinaten von TP wurde mittels GIS-Grid, Geoidmodell und Höhen-Grid die Lage- und Höhentransformation nach MGI durchgeführt. Die daraus resultierenden Transformationsergebnisse im MGI wurden zur Analyse den bekannten MGI Koordinaten der TP gegenübergestellt.

6.1 Testgebiet Burgenland

Für die Untersuchungen im Testgebiet Burgenland wurden 38 TP verteilt über das gesamte Nordburgenland herangezogen. Die Lagetransformation zwischen ETRS89 und Gauß-Krüger (MGI) wurde mittels der GIS-Grid Transformationsfläche durchgeführt. Die Differenzen zu den Gebrauchskordinaten (Rechts- und Hochwert) sind dem Histogramm in Abb. 11 zu entnehmen. Die maximalen Differenzen lagen zwischen $-0,07$ m und $+0,05$ m. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt im Testgebiet 0,02 m.

In einem 2. Schritt wurde die Höhentransformation mittels des Höhen-Grids durchgeführt. Der Vergleich mit den Gebrauchshöhen ist in der Abb. 12 visualisiert. Die maximalen Differen-

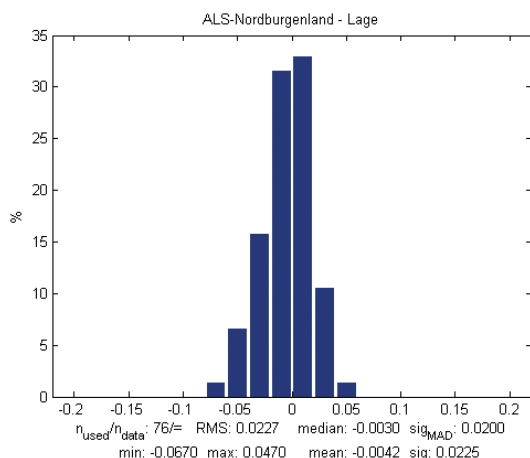


Abb. 11: Ergebnisse der Analyse der Lagetransformation Nordburgenland (Differenzen in [m])

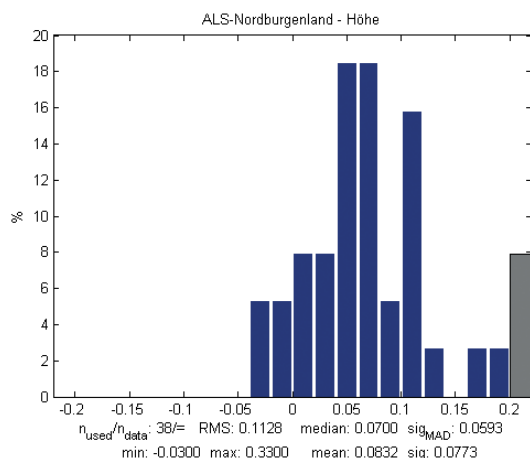


Abb. 12: Ergebnisse der Analyse der Höhentransformation Nordburgenland (Differenzen in [m])

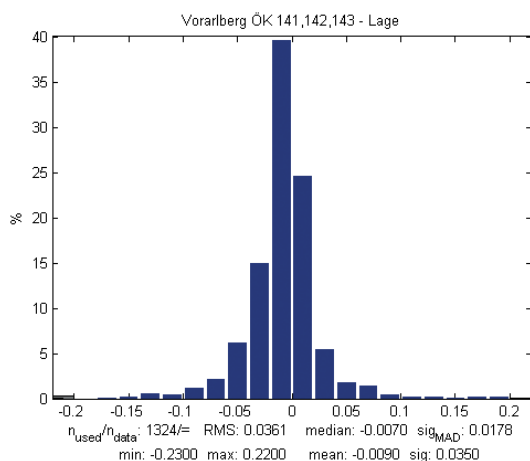


Abb. 13: Ergebnisse der Analyse der Lagetransformation Vorarlberg (Differenzen in [m])

zen betragen $-0,03$ m und $0,33$ m. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt $0,08$ m, die robust bestimmte Standardabweichung (Reduktion des Einflusses grober Fehler) beträgt hingegen nur $0,06$ m. Bei der punktwweisen Analyse der Ergebnisse konnten Differenzen größer als $0,1$ m den TP ohne Nivellementanschluss zugeordnet werden.

6.2 Testgebiet Vorarlberg

Im Testgebiet Vorarlberg wurden 662 TP dreier ÖK 50 (Österreichische Karte 1:50 000; ÖK 141, 142 und 143) zur Genauigkeitsuntersuchung herangezogen. Die Lagetransformation mit dem GIS-Grid führte zu maximalen Differenzen von $-0,23$ m und $+0,22$ m. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt $0,04$ m. Ein Histogramm der Differenzen ist der Abb. 13 zu entnehmen.

Die Höhentransformation anhand des Höhen-Grids führte zu einem signifikant asymmetrischen Histogramm (siehe Abb. 14). Während auf der negativen Seite eine Gauß-ähnliche Verteilung ersichtlich ist sind auf der positiven Seite viele Differenzen größer als $0,05$ m ersichtlich. Die maximalen Höhendifferenzen betragen $-0,21$ m und $+0,37$ m. Die Standardabweichung der Differenzen beträgt $0,10$ m. Eine genauere Analyse der räumlichen Verteilung der Differenzen ist der Abb. 15 zu entnehmen (die Differenz im linken unteren Bereich der Abbildung stellt eine Referenzdifferenz (künstlich eingefügter Punkt) von $0,20$ m dar). Im östlichen Teil des Testgebietes sind die Höhendifferenzen im Gegensatz zum westlichen Teil signifikant geringer. Eine stichprobenartige, punktwweise Analyse der Höhendifferenzen deutet auf aktuelle Defizite der MGI Gebrauchshöhen hin. Die asymmetrische Verteilung ist auf die Nichtberücksichtigung von Lotabweichungseinflüssen zurückzuführen (Lotabweichungen erst ab 1987 verfügbar). Der größte Einfluss der Lotabweichung auf Höhenwinkel ist beim Übergang von Talpunkten (meist mit Nivellementanschluss) zu den unmittelbar benachbarten Gipfelpunkten gegeben und beträgt in diesem Gebiet bis zu $0,20$ m. Zwischen Punkten der Gipfelflur ist der Einfluss der Lotabweichung auf den Höhenwinkel bzw. den daraus abgeleiteten Höhenunterschied zwar gering, deren Höhen sind allerdings um den Betrag des beim Übergang entstandenen systematischen Fehlers zusätzlich verfälscht.

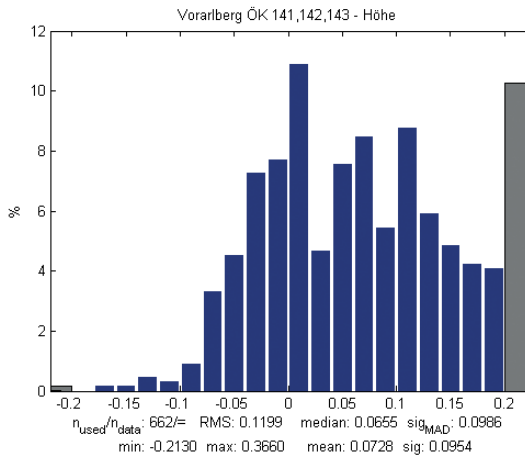


Abb. 14: Ergebnisse der Analyse der Höhentransformation Vorarlberg (Differenzen in [m])

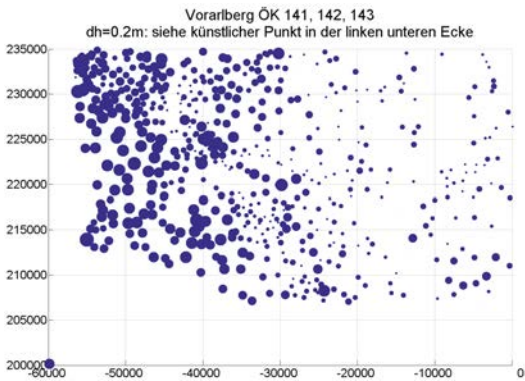


Abb. 15: Ergebnisse der Analyse der Höhentransformation Vorarlberg; Lageverteilung der Differenzen

7. Korrekturwerte zwischen Höhen-Grid und der Gebrauchshöhe der Triangulierungspunkte (TP)

In der Praxis wird sich vielfach die Notwendigkeit ergeben, eine auf Lagefestpunkte basierende terrestrische Geländeaufnahme mit einem Höhenmodell aus dem Laserscanning, welches unter Anwendung des Höhen-Grid erstellt wurde, zu kombinieren. Zu diesem Zweck werden, zusätzlich zum Höhen-Grid, Korrekturwerte k_{LFP} angeboten, welche die Abweichungen der mittels Höhen-Grid abgeleiteten Gebrauchshöhen zu jenen der TP beschreiben:

$$k_{LFP} = H_{orth} - H_{geb(LFP)} - \Delta H_{HGGrid} \quad (14)$$

Die Umwandlung einer Gebrauchshöhe $H_{geb(LFP)}$ aus der Punktkarte des Lagefestpunktes in eine Gebrauchshöhe $H_{geb(Niv)}$ im Niveau der Nivellementhöhen erfolgt durch:

$$H_{geb(Niv)} = H_{geb(LFP)} + k_{LFP} \quad (15)$$

Der Korrekturwert für einen Lagefestpunkt kann nur dann angegeben werden, wenn auch dessen orthometrische Höhe (aus GNSS-Messung und Geoid) bekannt ist. Der Ablauf in der Auswertung ist aus der Abb. 16 zu ersehen.

Ein an der terrestrischen Geländeaufnahme beteiligter Lagefestpunkt, der nicht an das Nivellement angeschlossen ist, benötigt eine Gebrauchshöhe $H_{geb(Niv)}$. Diese erhält man über den vom BEV bereitgestellten Korrekturwert k_{LFP} für einen Punkt mit bekannten ETRS89-Koordinaten. Ist kein Korrekturwert verfügbar, ist zunächst die orthometrische Höhe H_{orth} zu ermitteln (z.B.

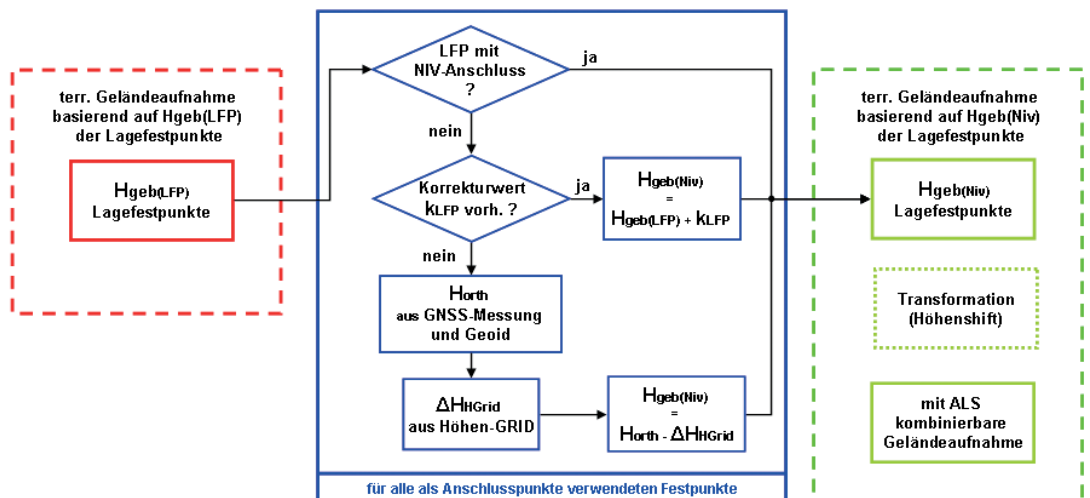


Abb. 16: Verschneiden terrestrischer Geländeaufnahmen mit ALS-Daten

über eine GNSS-Messung), um dann mit dem Wert ΔH_{HGrid} aus dem Höhen-Grid die benötigte Gebrauchshöhe zu erhalten.

Sind die Gebrauchshöhen $H_{\text{geb(Niv)}}$ für alle Lagefestpunkte bekannt, kann nunmehr die Auswertung der terrestrischen Geländeaufnahme vorgenommen werden. Liegt bereits eine Auswertung im System der Gebrauchshöhen $H_{\text{geb(LFP)}}$ vor, kann der Übergang in das System der Gebrauchshöhen $H_{\text{geb(Niv)}}$ über eine Transformation erfolgen.

8. Zusammenfassung

Mit dem GIS-Grid (1 × 1 km Gitterabstand, Datenformat: ntv2) und dem Höhen-Grid (500 × 500 m Gitterabstand, Datenformat: GeoTIFF und ASCII) stehen in Österreich sowohl Lage- als auch Höhen-Transformationsflächen zur Transformation zwischen ETRS89 und MGI zur Verfügung. Mit Hilfe beider Modelle können die Deformationen des lokalen Gebrauchsreferenzrahmens in Bezug zum vergleichsweise spannungsfreien übergeordneten Referenzrahmen bezogen auf ETRS89 und zum EVRS berücksichtigt werden. Die Genauigkeit der Lagetransformation der beiden vorgestellten Testgebiete zeigt Standardabweichungen der Koordinatendifferenzen deutlich kleiner als 0,15 m. Die Genauigkeitsuntersuchung der Höhentransformation ist vergleichsweise stark von lokalen Defiziten des Gebrauchshöhennetzes bei den TP geprägt. Bei Punkten mit Nivellementanschluss liegen die Differenzen im Bereich < 0,5 cm (1 sigma). Im Mittelgebirge wird mit dem Höhen-Grid eine Standardabweichung von < 2,0 cm (1 sigma) erreicht. In Hochgebirgsregionen wird die Genauigkeit des Höhen-Grids über den o. a. 2,0 cm liegen, wobei jedoch anzumerken ist, dass im Allgemeinen die Genauigkeitsanforderungen an die Höhenkomponente in diesen Bereichen wesentlich geringer ist als in urbanen Regionen.

Bei der praktischen Anwendung dieser Transformationswerkzeuge soll erwähnt werden, dass dieser Übergang in den verzerrten lokalen Referenzrahmen möglichst spät im Rahmen der Datenprozessierung erfolgen sollte. Beim Beispiel ALS sollte diese Transformation erst nach einer relativen und absoluten Fein-Georeferenzierung (Streifenanpassung, siehe [19], [20]) im globalen spannungsfreien Referenzrahmen erfolgen. Weiters soll die Wichtigkeit einer einheitlichen, reproduzierbaren und dokumentierten Vorgangsweise bei der multi-temporalen Analyse von Datenbeständen (z.B. großflächiges Deformationsmoni-

toring oder Gletschermonitoring) hervorgehoben werden.

Die Analyse der glatten Transformationsfläche Höhen-Grid in Bezug zu den aktuell verwendeten Gebrauchshöhen der TP zeigt deutliche Defizite im Bereich des aktuell verwendeten Referenzrahmens. Daher sollte das mittelfristige Ziel sein, den durch das Höhen-Grid realisierten Bezugsrahmen als homogenes Gebrauchshöhensystem einzuführen. Durch die schrittweise Bestimmung der Korrekturwerte zum aktuellen Gebrauchssystem kann ein Übergang in den homogenen durch das Höhen-Grid repräsentierten Referenzrahmen erfolgen. Die in Zukunft steigende Verfügbarkeit von dichten, hochgenauen digitalen Oberflächen- und Geländemodellen (z.B. aus ALS-Beobachtungen oder der automatischen digitalen Bildzuordnung) kann zukünftig eventuell genutzt werden um eine Verbesserung der Höhentransformationsfläche zu ermöglichen.

Langfristig sollte auch in der Praxis das Ziel sein für Lage und Höhe mit den homogenen Bezugsrahmen ETRF89 und EVRF zu arbeiten, damit homogene Messungen mittels GNSS nicht in die bestehenden, deformierten Bezugsrahmen des MGI eingezwängt werden müssen und so auch der Anschluss zu den Nachbarländern bei grenzüberschreitenden Projekten gegeben ist. GIS-Grid und Höhen-Grid sind natürlich auch für die Umrechnung von MGI in ETRS89 und EVRS anwendbar.

Verfügbar ist das Höhen-Grid als kostenloser Download über das Portal des BEV [7].

Danksagung

Die Autoren danken Prof. Dr. Erwin Heine, Prof. Dr. Norbert Kührtreiber, Dr. Gottfried Mandlbürger, Prof. Dr. Norbert Pfeifer, Prof. Dr. Robert Weber und Prof. Dr. Andreas Wieser für die aktive Beteiligung an der Diskussion zur Höhentransformationsfläche Höhen-Grid.

Weiters sei auch Hr. Günter Gaber, Mitarbeiter der Abteilung Grundlagen des BEV, für seinen intensiven Einsatz bei der praktischen Umsetzung der Transformationsfläche Höhen-Grid gedankt.

Das Ludwig Boltzmann Institut für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie (archpro.lbg.ac.at) basiert auf der internationalen Kooperation der Ludwig Boltzmann Gesellschaft (A), der Universität Wien (A), der Technischen Universität Wien (A), der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (A), dem Land Niederösterreich (A), Airborne Technologies GmbH (A), RGZM- Römisch-Germanisches Zentralmuseum Mainz (D), RAÄ-Swedish National Heritage Board (S), IBM VISTA Universität Birmingham (GB) und NIKU-Norwegian Institute for Cultural Heritage Research (N).

Literaturverzeichnis

- [1] *EUREF*, http://www.euref-iag.net/euref_egrs.html, 31.1.2012.
- [2] *MGI*, http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2157079&_dad=portal&_schema=PORTAL, 31.1.2012.
- [3] *Csanyi, N., Toth, C.K. (2007)*: Improvement of Lidar Data Accuracy Using Lidar-Specific Ground Targets. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73 (4), 385-396.
- [4] *Vosselman, G. (2008)*: Analysis of planimetric accuracy of airborne laser scanning surveys. *IAPRS XXXVII*, 3A, Beijing, China, 99-104.
- [5] *Sande, C., Soudarissanane, S., Khoshelham, K.*: Assessment of Relative Accuracy of AHN-2 Laser Scanning Data Using Planar Features. *Sensors* 2010, 10(9), 8198-8214; doi:10.3390/s100908198.
- [6] *BEV GIS-Grid*. http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2157075&_dad=portal&_schema=PORTAL, 31.1.2012.
- [7] *BEV Höhen-Grid*, http://www.bev.gv.at/portal/page?_pageid=713,2204753&_dad=portal&_schema=PORTAL
- [8] *Hofmann-Wellenhof, B., Moritz, H.*: *Physical Geodesy*, Springer Verlag Wien, New York, 2005, ISBN-10 3-211-23584-1. pp 157-172.
- [9] *Höggerl, N., Ruess, D.*: The new orthometric height system in Austria. *Proceedings of the EUREF 2003 Symposium, Toledo, Spain*. EUREF Publication No. 13. *Mitteilungen des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie*, Band 33, Frankfurt Main, 2004, ISSN 1436-3445, ISBN 3-89888-885-1.
- [10] *Titz, H., Höggerl, N., Imrek, E., Stangl, G.*: Realisierung und Monitoring von ETRS89 in Österreich. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 98. Jg., 2/2010, 52-61, 2010, ISSN 1605-1653.
- [11] *Imrek, E., Höggerl, N.*: Modernisierung des geodätischen Bezugsrahmens in Österreich. In: 16. Internationale Geodätische Woche Obergurgl 2011 (Grimm-Pitzinger/Weinold Hrsg.), Herbert Wichmann Verlag Berlin, 2011. ISBN 978-3-87907-505-8.
- [12] *Höggerl, N.*: Contribution of Austria to the UELN. In: Report of the Symposium of the IAG Subcommission for the European Reference Frame (EUREF) held in Helsinki 3-6 May 1995. Veröffentlichung der Bayerischen Kommission für die internationale Erdmessung. *Astronomisch – Geodätische Arbeiten*, Heft Nr. 56, München 1995.
- [13] *Pail, R., Kühtreiber, N., Wiesenhofer, B., Hofmann-Wellenhof, B., Of, G., Steinbach, O., Höggerl, N., Imrek, E., Ruess, D., Ullrich, C.*: The Austrian Geoid 2007. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 96. Jg., 1/2008, 3-14, 2008, ISSN 0029-9650.
- [14] *Zeger, J.*: Historische Entwicklung des Präzisionsnivelements in Österreich. *Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie*, 74. Jg., 4/1986, ff 250-263.
- [15] *Schlatter, A., Marti, U.*: Aufbau der neuen Landesvermessung der Schweiz LV95'. Teil 12, Landeshöhen-netz ‚LHN95‘. Bericht 20, 2007, Bundesamt für Landestopographie, Wabern, ISBN 978-3-302-10002-9.
- [16] *Meurers, B., Ruess, D.*: Compilation of a new Bouguer gravity data base in Austria. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation*, 95. Jg., 2/2007, ff 90-94, ISSN 0029-9650.
- [17] *Ruess, D., Höggerl, N.*: Orthometric Height System in Austria by Refined Methods of Gravity Reductions. Presentation at the 8. international meeting on Alpine Gravimetry, Leoben, 2000.
- [18] *Ruess D.*: Schwere und Höhe im alpinen Bereich. 7. *Geodätische Woche in Obergurgl*, 1993; Univ. Innsbruck, Inst. f. Geodäsie, *Institutsmitteilungen* Heft 15, 44-58, Innsbruck, 1993.
- [19] *Kager, H. (2004)*: Discrepancies Between Overlapping Laser Scanning Strips- Simultaneous Fitting of Aerial Laser Scanner Strips, *ISPRS XXth Congress, Istanbul, Vol XXXV, Part B/1 (2004)*, ISSN: 1682-1750; 555 - 560.
- [20] *Ressl, C., Pfeifer, N., Mandlbürger, G. (2011)*: Applying 3D affine transformation and least squares matching for airborne laser scanning strips adjustment without GNSS/IMU trajectory data. *ISPRS Workshop Laser Scanning 2011, ISPRS, XXXVIII / 5 / W12 (2011)*, ISSN: 1682-1777; 6 pages.

Anschrift der Autoren:

Dr. Christian Briese, Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Technische Universität Wien
Gußhausstr. 27-29/E122, A-1040 Wien; LBI für Archäologische Prospektion und Virtuelle Archäologie, Hohe Warte 38, A-1190 Wien.
E-Mail: cb@ipf.tuwien.ac.at

Dipl.-Ing. Norbert Höggerl, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.
E-Mail: norbert.hoeggerl@bev.gv.at

Dipl.-Ing. Erich Imrek, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.
E-Mail: erich.imrek@bev.gv.at

Dipl.-Ing. Jürgen Otter, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.
E-Mail: juergen.otter@bev.gv.at

Dr. Diethard Ruess, Abt.V1-Grundlagen, Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen, Schiffamtsgasse 1-3, 1020 Wien.
E-Mail: diethard.ruess@bev.gv.at